

# 静止无功发生器 SVG 原理及工程应用的若干问题

庄文柳<sup>1</sup>, 张秀娟<sup>2</sup>, 刘文华<sup>3</sup>

(1. 上海电力设计院有限公司, 上海 200025; 2. 思源清能电气电子有限公司, 上海 201108;  
3. 清华大学电机系柔性交流输配电系统研究所, 北京 100084)

**摘要:**介绍 SVG 的原理、特点及在各领域的应用, 在此基础上结合上海蒙自变电站的 6 Mvar SVC + + (3Mvar 的 SVG 与 3 Mvar 的 FC 并联运行) 动态无功补偿项目说明了 SVG 在工程应用中涉及的主电路选择、损耗计算和散热设计、电磁干扰设计等相关方面应注意的问题和采取的措施。

**关键词:** SVG; 主电路; 电磁屏蔽

**作者简介:**庄文柳 (1979-), 男, 高级设计师, 工程师, 从事输变电工程设计工作。

**中图分类号:** TM631 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-9529 (2009) 08-1295-05

## Principles and engineering application of SVG

ZHUANG Wen-liu<sup>1</sup>, ZHANG Xiu-juan<sup>2</sup>, LIU Wen-hua<sup>3</sup>

(1. Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd. Shanghai 200025;

2. Siyuan Qingneng Electrical and Electronics Co., Ltd. Shanghai 201108;

3. Department of Electric Machine Engineering and Electronics Technology Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** The principles, characteristics and application of SVG are introduced firstly. Then based on the dynamic Var compensator project of 6 MVar SVC + + in Mengzi substation, some important issues and corresponding solutions are discussed in detail, including selection of the major circuit, calculation of the power loss, design of the heat dissipating part and the EMI design.

**Key words:** SVG; major circuit; EM shielding

## 1 SVG 的原理

基于大功率电力电子技术的柔性交流输电系

统 (Flexible AC Transmission System, FACTS) 技术广泛应用于电力工业, 对增强电力系统运行的稳定性和安全性、提高输电能力和用电效率、节能及改善电能质量等方面发挥越来越重要的作用。静

止同步补偿器 (static synchronous compensator, 简称 STATCOM, 国内常称为静止无功发生器 Static Var Generator, 简称 SVG) FACTS 装置的原理: 将电压源型逆变器 VSC (Voltage Sourced Converter), 经过电抗器或者变压器 T 并联在电网上, 通过调节逆变器交流侧输出电压  $V_2$  的幅值和相位, 改变输入系统的无功电流  $I$  的幅值, 达到迅速吸收或者发出无功功率的效果, 实现快速动态调节无功的目的。

传统的 SVG 采用 M- 控制, 物理概念清晰, 控制简单。但是 M- 控制要求控制角精度高、系统同步精度高, 否则会出现过流的情况, 不适合需要补偿冲击、谐波及不对称负荷的场合。而直接瞬时电流控制降低了对系统电压同步信号的依赖性, 可快速跟踪负荷电流变化, 承受冲击能力强<sup>[1]</sup>。SVG 原理接线及直接瞬时电流控制方法见图 1。采用直接瞬时电流控制, SVG 不仅可以跟踪补偿冲击型负载的无功冲击电流, 而且可以跟踪补偿负荷产生的谐波电流。

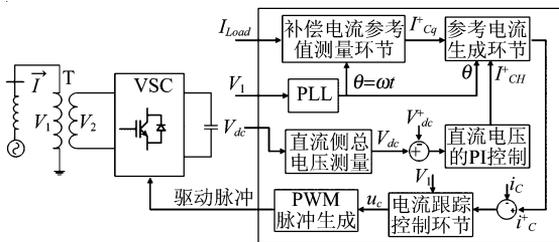


图 1 SVG 控制方法示意图

与目前广泛应用的动态无功补偿设备静止无功补偿器 (Static Var Compensator, 简称 SVC) 相比, SVG 具有更好的性能<sup>[2]</sup>。

(1) 启动冲击小: 采用自励方式启动, 速度快且冲击电流可限制在很小的幅值。

(2) 动态连续补偿: 可以从额定的感性工况到额定容性工况连续输出, 与固定电容器或电抗器组合可构成任意范围连续补偿。

(3) 响应速度快: 具有 5 ~ 10 ms 的快速输出无功特性, 而传统的 SVC 响应时间一般在 40 ~ 60 ms (太快可能引起电抗和电容器产生振荡)。

(4) 谐波特性好: SVG 输出电流完全可控, 可以输出接近正弦的基波无功电流。特别的, 链式结构的 SVG, 由于不需要连接变压器, 而且等效开关频率高, 可实现谐波补偿功能。而 SVC 在运行过程中会产生大量不可控的谐波电流, 需要

附带大量无源滤波支路来对自身产生的谐波电流进行滤波。

(5) 占地面积小: 安装尺寸一般只有 SVC 的 1/2 ~ 1/3, 还可以做成移动式装置, 配置起来更加灵活。

(6) 损耗小效率高: SVG 等效运行损耗一般只有 SVC 的 1/3 ~ 1/2, 等效运行耗电量大大低于 SVC。

(7) 补偿能力强: SVG 输出电流不依赖于系统电压, 系统电压跌至 20% 仍可输出额定无功电流, 而 SVC 输出电流与系统电压成正比下降。达到同等补偿效果 SVG 容量可以比 SVC 容量小 20% ~ 30%。

(8) 可靠性好: SVG 可等效为一个可控电流源, 对外部系统运行条件和结构变化不敏感, 不会出现振荡现象。而 SVC 采用大量电容电抗器, 当外部系统容量与补偿装置的容量可比时, 会产生不稳定性而发生振荡。

## 2 SVG 的应用

SVG 以其优越的性能, 不仅在电力系统, 在其他行业 (如: 冶金、风电、煤矿、铁路牵引供电与轨道交通、港口、机械制造等) 也得到广泛的应用。

### (1) 电力系统

自从 1980 年世界上第 1 台基于 GTO 器件的 SVG 装置在日本投运以来, 统计至 2007 年, 世界上已安装投运的用于输电网的大容量 SVG 有 20 多套, 单机最大容量 160 MVA<sup>[3]</sup>。在配电系统更是得到普遍应用, SVG 用于电力系统主要起到如下作用: 1) 抑制电力系统过电压, 改善系统电压稳定性; 2) 提高系统暂态稳定水平, 减少低压释放负荷数量, 并防止发生暂态电压崩溃; 3) 动态地维持输电线路端电压, 提高输电线路稳态传输功率极限; 4) 阻尼电力系统功率振荡; 5) 改善配电系统电能质量。

### (2) 冶金行业

在现代冶金工业生产中, 炼钢电弧炉和轧钢机等冲击性负荷得到了广泛应用。这些负荷容量大, 有功电流和无功电流变化剧烈且无规律, 导致供电线路功率因数恶化, 造成了电网电压波动和闪变, 有的甚至还会造成电网的三相不平衡和谐波污染。

对于这种由于快速剧烈的无功波动带来的一系列电能质量问题,传统的无功补偿装置例如投切电容器、SVC等,响应速度在一个周波以上,无法满足快速变化的负荷要求,而 SVG的快速连续调节的特点能很好地解决这类负荷所带来的问题。

以 SVG应用于电弧炉为例<sup>[4]</sup>: 1)对供电系统,SVG响应速度快,可快速跟踪电弧炉的无功波动和谐波,从而稳定并提高系统平均电压,降低电压闪变和谐波电流; 2)对电弧炉负荷,显著减少断弧现象,提高了冶炼效率,吨钢电耗量一般可减少 10%以上,单炉冶炼时间也可缩短 8%~15%,也可大大降低谐波过电压带来的电缆绝缘损坏频度,带来显著的经济效益。

### (3) 可再生能源(风电)

为应对全球气候变化,减少温室气体排放,可再生能源领域吸引了越来越多的投资,特别是风力发电。而风力发电机为异步电机,在运行过程中需要吸收大量无功,因此在风电场必须进行动态无功补偿。以前,风电场通过安装一定的投切电容器来补偿风电场的无功需求,典型的风电场每天会有 50~100次投切电容的动作。频繁的开关操作大大降低了电容器开关的寿命。另外,频繁投切电容带来的电压跳变还会影响风力发电机的齿轮箱,使之承受更多的压力。相比之下,SVG调节速度快,可以平滑连续的调节输出无功,是理想的风电场无功补偿方案选择: 1)动态补偿无功,提高风机瞬时功率因数,使风电场在任意风段都能高功率因数输出电能; 2)采用链式 SVG,可实现 25次以下谐波的有源滤波功能。不仅装置本身从根本上避免了谐振的问题,大大提高了运行安全性,而且可以净化电网,保证风机的安全运行; 3)输出特性受电压影响小,响应时间短,可以有效地抑制电压波动和闪变,同时可在系统异常情况下提供动态电压支撑,提高风电机组和电网的运行安全性。

由于优异的性能,SVG在风电场的应用日益增多。国外截至 2008年已经在世界范围内安装了至少 50套以上用于风电场的 SVG。

### (4) 煤矿企业

由于煤矿企业采用大量的感应电动机用于矿井提升,特别是近年来大功率可控硅的应用,使得供电系统除供给有功功率外,还需供给大量无功

功率,使发电和输配电设备的能力不能得到充分利用。另外可控硅的应用使得供电电网受到谐波和电压波动等不利影响。为此,必须提高用户的功率因数,减少对电源系统的无功需求量,同时减少对系统电能质量的影响。

结合煤矿负荷分散的特点,可以采用 6~10 kV的链式 SVG进行分散式补偿,不仅减少供电系统的无功压力,使无功动态平衡,稳定供电电压,还可以利用 SVG的谐波补偿能力实现对负荷的谐波滤波功能,大幅度地提高供电电能质量和可靠性,同时减少负荷对系统的影响。

### (5) 电气化铁路与轨道交通

电气化铁路具有快速、牵引力大、无直接污染等优点,在国内外发展很快,我国牵引电网使用的是单相 50 Hz/25 kV标准,牵引变电站将三相高压电转换成适合电力机车使用的单相 27.5 kV电源。目前电力机车大多采用相控整流,机车功率大、速度变化频繁,并且位置在不断变化,因此电气化铁路供电系统的功率因数低、谐波含量高、负序电流大。

在牵引电网采用动态无功补偿可以有效地解决这些问题。特别是在副边牵引电网侧采用 3相 SVG补偿方案,不仅能稳定牵引电网的电压,保证牵引电网供电的安全可靠性,还可以提高电铁负荷的功率因数,滤除低次谐波,消除负序电流的影响。由于电铁负荷的负载率低,负荷冲击性大,采用动态性能优越的 SVG方案较 SVC方案更为经济和有效。

轨道交通通常采用直流牵引,在输电系统侧也会产生无功冲击及各谐波,亦可采用 SVG同时对无功波动及谐波进行治理。

## 3 SVG技术应用中的若干问题

### 3.1 技术方案说明

以上海 110 kV蒙自变电站 10 kV动态无功补偿及谐波治理成套装置 SVC++为例,主接线见图 2,额定补偿容量为 6 Mvar,由 1套容量为  $\pm 3$  Mvar的静止无功发生器 SVG和 1套补偿容量为 3 Mvar的固定电容器组构成。

### 3.2 主电路构成选择

本项目中 SVG直接挂在 10 kV母线上,主电路采用链式结构,见图 3。与多重化/多电平结构 SVG相比,链式结构的优点<sup>[5-8]</sup>: 1)可以独立分相

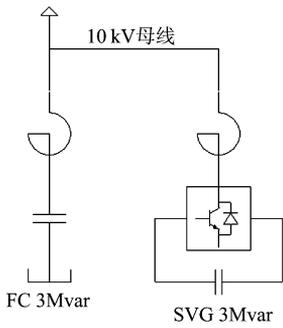


图 2 上海蒙自变电站 SVC+ 配置图

控制,有利于解决系统的相间平衡问题,在系统受到扰动时,更好地提供电压支撑;2)所有链节的结构完全相同,可以实现模块化设计,便于扩展装置容量及维护;3)每相电路中可设置 1~2 个冗余链节,1~2 个链节单元损坏后仍可继续满负荷运行,提高了装置的可靠性;4)省去了连接变压器,减少了占地面积,降低了装置成本和损耗,效率可达 99.2% 以上。

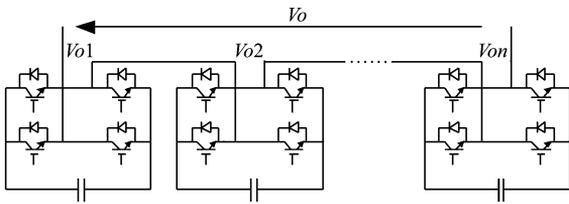


图 3 链式 SVG 一相桥臂示意图

主电路功率器件没有采用西郊变电站 50 Mvar 链式 STATCOM 所用的集成门极换流晶闸管 IGCT,而是采用绝缘栅双极晶体管 IGBT。

IGBT 是一种 N 沟道增强型场控 (电压) 复合器件,兼有功率 MOSFET 和双极性器件的优点:输入阻抗高、开关速度快 (可达 10 kHz 以上)、安全工作区宽、饱和压降低 (甚至接近 GTR 的饱和压降)。但其电压和电流容量还很有限,高压大电流 IGBT 器件至今尚未出现,国外的一些厂家如瑞士 ABB 公司采用软穿通原则研制出了 8 kV 的 IGBT 器件,德国 EUPEC 生产的 6 500 V / 600 A 高压大功率 IGBT 器件也获得实际应用。目前 IGBT 主要应用于中等容量的变流器中。

本方案 SVG 规格为 3 Mvar / 10 kV,考虑成本和输出性能,选用 IGBT 比 IGCT 更为合适。

### 3.3 功率器件的损耗和散热设计

在尽量通过优化设计等方式来减少功率开关发热量的同时,一般还需要通过散热器利用传导、对流、辐射的传热原理,将器件产生的热量快速释

放到周围环境中去。目前对散热器的传热分析国内外都还研究得很不够,工程应用中的设计大多是凭经验选取,并作相应的核校计算。

以一个链节单元为例计算,采用 EUPEC 1 700 V / 300 A IGBT,额定电流 173.3 A,开关频率 400 Hz。

#### (1) 功率器件的通态损耗

功率器件在周期性的开通、关断过程中处于开通状态时的功率损耗。在功率模块工作过程中,电流通过 IGBT 和续流二极管流通,因此通态损耗包含 IGBT 和二极管 2 部分。

单个 IGBT,平均通态损耗为

$$P_{st1} = U_{on} I_{st} = 55.4 \text{ (W)}$$

单个二极管,平均通态损耗为

$$P_{st2} = U_{on} I_{st} = 52.0 \text{ (W)}$$

式中  $U_{on}$  —— 开关器件通态压降;

$I_{st}$  —— 流过开关器件的等效电流。

#### (2) 功率器件的开关损耗

功率器件开关损耗包括了开通损耗和关断损耗。开关的开通和关断过程伴随着电压和电流的剧烈变化,因此产生较大的损耗,而且开关损耗的大小在很多情况下占有了器件总的功率损耗的相当大比重,尤其是当器件处于高频工作情形下。

单个 IGBT 开关损耗为

$$P_{on-off1} = (E_{on} + E_{off}) f = 23.9 \text{ (W)}$$

单个二极管开关损耗为

$$P_{on-off2} = E_{rec} f = 9.4 \text{ (W)}$$

式中  $E_{on}$  —— 开关器件开通损耗;

$E_{off}$  —— 开关器件关断损耗;

$f$  —— 器件的动作频率。

#### (3) 功率器件的断态漏电流损耗

一般情况下,器件处于关断状态时的集电极 (漏极) 漏电流十分微小,可认为器件无损耗,只有在断态电压很高的情况下,微小的漏电流才可能产生较为显著的断态功率损耗。可以忽略该项。

#### (4) 功率器件的驱动损耗

功率器件在开关过程中消耗在驱动控制板上的功率以及在导通状态时维持一定的栅极电压、电流所消耗的功率称为开关器件的驱动损耗。其功率损耗与器件的其他部分损耗相比可以忽略不计。

综上所述,模块总的损耗为

$$P_{md} = 4 \times (P_{st1} + P_{st2} + P_{on-off1} + P_{on-off2}) = 562.8 \text{ (W)}$$

结合以上计算结果,采用优质铝合金散热器,强制风冷散热即可达到预定的散热目标,保证装置的正常稳定运行。考虑到本工程配套同容量电容补偿,成套装置运行损耗在 0.8% 以下。

### 3.4 电磁屏蔽防护措施

由于 SVG 主逆变电路采用 PWM 控制方式,IGBT 工作频率较高,当根据给定频率和幅值指令产生预期的和重复的开关模式时,其输出的电压和电流的功率谱是离散的,并且带有与开关频率相应的高次谐波群。高载波频率和场控开关器件的高速切换 ( $dv/dt$  可达  $1 \text{ kV}/\mu\text{s}$  以上) 所引起的辐射干扰问题相当突出。由于 SVG 逆变电路功率较大,对其他电气设备干扰性较强,其干扰途径与一般电磁干扰途径是一致的,主要分传导(即电路耦合)、电磁辐射、感应耦合。

本项目 SVG 部分采用链式结构,各个链节的直流电压低,相应的  $dv/dt$  小,造成的干扰较其他主电路结构小。另外在设计时,还采取了以下有效的防止电磁干扰的措施。

(1) 输出滤波器 连接电抗器使 SVG 输出与系统耦合连接的同时,同时能够有效地削弱输出电流中的高次谐波成分,从而起到抑制高频电磁干扰的目的。

(2) 光纤信号传输 功率模块和控制器之间准确的信息传递是保障 SVG 能正常工作的重要条件之一,采用光耦和光纤进行信号传递,实现了电隔离,不仅响应速度快,传输效率高,而且还避免了各种电磁干扰信号对信号长距离传输的影响,也有效地抑制了共模干扰的影响。

(3) 有效的屏蔽 屏蔽干扰源是抑制干扰的最有效的方法。功率模块外壳采用铁壳屏蔽,防止 IGBT 工作时的电磁干扰泄露;控制及信号线均采用双芯屏蔽,确保屏蔽罩可靠接地;同时 SVG 设备的柜体均采用不低于  $1.2 \text{ mm}$  厚镀锌优质冷轧钢板,其他物料均选用抗电磁辐射干扰的材料,门口经特殊防磁材料处理,加装金属弹性密封,保证门框与柜体接触紧密,减少由于加工装配误差所造成的缝隙,提高电磁屏蔽效果。

(4) 正确的接地 正确的接地既可以使系统有效地抑制外来干扰,又能降低设备本身对外界

的干扰。接地导线选用的截面积不小于  $25 \text{ mm}^2$ ,柜体内部采用接地铜排与  $25 \text{ mm}^2$  的接地铜编织带确保系统可靠接地,同时保证接地线长度尽量短,以减小接地电阻。

## 4 结语

SVG 并联于系统中,是一种动态无功补偿装置,具有响应速度快,谐波特性好,补偿特性好,效率高等特点,在电力、冶金、煤矿、轨道交通等行业均有很好的应用前景。

对 SVG 的工程应用中出现的问题进行了说明:针对不同配置下 SVG 的主电路选择、SVG 功率单元的损耗计算、电磁屏蔽防护措施设计等。

基于 IGBT 的链式主电路结构型 SVG,性能及投资都优于 IGCT 型 SVG,链式结构不仅可靠性高,运行成本(损耗)也低,同时 IGBT 开关频率也远低于变压器降压型 SVG,对环境电磁干扰小,是一种更优的主电路结构。

### 参考文献:

- [1] 朱永强. 变压器隔离型链式 D-STATCOM 与不平衡负荷补偿研究 [D]. 北京:清华大学,2005.
- [2] 冯煜理,陈 陈. 静止同步补偿器与传统静止无功补偿器的比较与分析 [J]. 华东电力,2005,33(9): 16-19.
- [3] 袁志昌. 链式静止同步补偿器的控制与保护策略研究 [D]. 北京:清华大学,2006.
- [4] 许树楷,宋 强,刘文华,等. 配电系统大功率交流电弧炉电能质量问题及方案治理研究 [J]. 中国电机工程学报,2007,27(19): 93-98.
- [5] Ainsworth J D, Davies M, Fitz P J, et al. Static Var Compensator (STATCOM) Based on Single-phase Chain Circuit Converters [J]. IEE Proceedings [J], Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145 No. 4, July 1998: 381-386.
- [6] An T, Powell M T, Thanawala H L, et al. Assessment of Two Different STATCOM Configurations for FACTS Application in Power Systems [C]. Power System Technology, 1998. Proceedings POWERCON98. 1998 International Conference on, Vol 1, 1998: 307-312.
- [7] Hanson D J, Woodhouse M L, Howill C, et al. STATCOM: a New Era of Reactive Compensation [J]. Power Engineering Journal, Vol 16 Issue 3, June 2002: 151-160.
- [8] Woodhouse M L, Donoghue M W, Osborne M. Type Testing of the GTO Valves for a Novel STATCOM Converter [C]. Proc. 2001 IEE AC-DC Power Transmission Conf : 84-90.

收稿日期:2009-05-21

本文编辑:邵振华